

PAT-NÖ: JP411068192A

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 11068192 A

TITLE: MULTI-TUNNEL JUNCTION, TUNNEL MAGNETORESISTANCE EFFECT  
ELEMENT, MAGNETIC SENSOR AND MAGNETIC RECORDING SENSOR  
HEAD

PUBN-DATE: March 9, 1999

INVENTOR-INFORMATION:

NAME

SATO, TOSHIHIKO

NAKATANI, RYOICHI

INABA, NOBUYUKI

ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME

HITACHI LTD

COUNTRY

N/A

APPL-NO: JP09221501

APPL-DATE: August 18, 1997

INT-CL (IPC): H01L043/08, G01R033/035 , G01R033/09 , G11B005/39 , H01F010/00

ABSTRACT:

PROBLEM TO BE SOLVED: To make operable at room temp.

SOLUTION: On a substrate 11 composed of an insulator layer a first soft magnetic material-made layer 210 is formed, an insulation layer 350 is formed on the substrate 11 and soft magnetic layer 210, a first and second tunnel barrier layers 310, 311 made from dielectric films are formed on a region surrounded by the insulation layer 350 on the magnetic layer 210, ferroelectric particles 110 of 10 nm or less are provided between the tunnel barrier layers 310, 311, and a second soft magnetic material-made layer 211 is formed on the barrier layer 311.

COPYRIGHT: (C)1999,JPO

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-68192

(43) 公開日 平成11年(1999) 3月9日

| (51) Int.Cl. <sup>6</sup>    | 識別記号 | F I            |   |
|------------------------------|------|----------------|---|
| H 0 1 L 43/08                |      | H 0 1 L 43/08  | Z |
| G 0 1 R 33/035               |      | G 0 1 R 33/035 |   |
| 33/09                        |      | G 1 1 B 5/39   |   |
| G 1 1 B 5/39                 |      | H 0 1 F 10/00  |   |
| H 0 1 F 10/00                |      | G 0 1 R 33/06  | R |
| 審査請求 未請求 請求項の数9 O L (全 10 頁) |      |                |   |

(21) 出願番号 特願平9-221501

(22) 出願日 平成9年(1997) 8月18日

(71) 出願人 000005108

株式会社日立製作所

東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地

(72) 発明者 佐藤 俊彦

東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地

株式会社日立製作所中央研究所内

(72) 発明者 中谷 亮一

東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地

株式会社日立製作所中央研究所内

(72) 発明者 稲葉 信幸

東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地

株式会社日立製作所中央研究所内

(74) 代理人 弁理士 中村 純之助

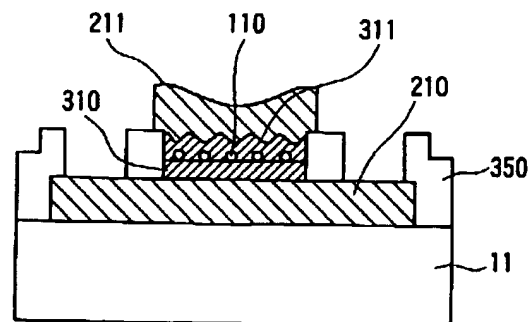
(54) 【発明の名称】 多重トンネル接合、トンネル磁気抵抗効果素子、磁気センサおよび磁気記録センサヘッド

(57) 【要約】

【課題】 室温で動作可能にする。

【解決手段】 絶縁体層からなる基板11上に軟磁性体材料からなる第1の軟磁性体層210を形成し、基板11、軟磁性体層210上に絶縁層350を形成し、軟磁性体層210上の絶縁層350により囲まれた領域に誘電体薄膜からなる第1、第2のトンネルバリア層310、311を形成し、トンネルバリア層310とトンネルバリア層311との間に粒径が10nm以下の強磁性体材料からなる強磁性体微粒子110を設け、トンネルバリア層311上に軟磁性体材料からなる第2の軟磁性体層211を形成する。

図1



- 11...基板
- 110...強磁性体微粒子
- 210...第1の軟磁性体層(ベース電極)
- 211...第2の軟磁性体層(トップ電極)
- 310...第1のトンネルバリア層
- 311...第2のトンネルバリア層

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】平面基板上に軟磁性体材料、強磁性体材料の一方からなる第1の磁性体層を形成し、上記第1の磁性体層上に第1、第2のトンネルバリア層を形成し、上記第1、第2のトンネルバリア層間に軟磁性体材料、強磁性体材料の他方からなる磁性体微粒子を設け、上記第2のトンネルバリア層上に軟磁性体材料、強磁性体材料の一方からなる第2の磁性体層を形成したことを特徴とする多重トンネル接合。

【請求項2】上記磁性体微粒子の自己容量を10aF以下としたことを特徴とする請求項1に記載の多重トンネル接合。

【請求項3】上記磁性体微粒子をコロイド微粒子としたことを特徴とする請求項1または2に記載の多重トンネル接合。

【請求項4】上記第1、第2のトンネルバリア層および上記磁性体微粒子を誘電体材料と強磁性体材料とをターゲットとした同時スパッタリングにより堆積した複合膜を加熱処理することによって形成したことを特徴とする請求項1に記載の多重トンネル接合。

【請求項5】上記磁性体微粒子を複数設けたことを特徴とする請求項1、2、3または4に記載の多重トンネル接合。

【請求項6】請求項1～5のいずれかに記載の多重トンネル接合を用いたことを特徴とするトンネル磁気抵抗効果素子。

【請求項7】請求項6に記載のトンネル磁気抵抗効果素子を用いた磁気センサにおいて、上記多重トンネル接合のブロッケイド領域内のバイアス電圧を加えることを特徴とする磁気センサ。

【請求項8】請求項6に記載のトンネル磁気抵抗効果素子を用いた磁気センサにおいて、上記第1、第2の磁性体層間に交流電圧を加える交流電圧源を設け、上記交流電圧の電流応答の内の第2高調波以上の周波数を有する高調波信号成分のみを取り出すハイパスフィルタを設けたことを特徴とする磁気センサ。

【請求項9】請求項7または8に記載の磁気センサを用いたことを特徴とする磁気記録センサヘッド。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は多重トンネル接合、トンネル磁気抵抗効果素子、磁気センサおよび磁気記録センサヘッドに関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】公知例1(K. Ono, Hiroshi Shimada, and Youiti Ootuka, "Enhanced Magnetic Valve Effect and Magneto-Coulomb Oscillations," Journal of the Physical Society of Japan, vol. 66, no. 5, May 1997, pp.1261-1264.)によれば、微小二重接合系において顕著な磁気抵抗効果が発現するとされており、微小二重

接合型のトンネル磁気抵抗(TMR)効果素子が記載されている。

【0003】図12は公知例1に記載された従来のトンネル磁気抵抗効果素子を示す図で、(a)は平面図、(b)は正断面図である。図に示すように、絶縁体層10の表面にNiからなる軟磁性体層(電極)200、201が形成され、軟磁性体層200、201の表面にNiOからなるトンネルバリア層(酸化膜バリア)300、301が形成され、軟磁性体層200と軟磁性体層201との間にCoからなる強磁性体層(島)100が形成されている。

【0004】このトンネル磁気抵抗効果素子においては、軟磁性体層200と軟磁性体層201との間に電圧Vを加えると、一方の軟磁性体層200に電子が注入され、トンネルバリア層300をトンネルし、強磁性体層100、トンネルバリア層301を通して、他方の軟磁性体層201に至る電流路が形成される。このような電子の経路に沿った電流をトンネル電流Iとする。この系は電流路上に2つのトンネルバリア層300、301が存在するため、二重接合系となっている。

【0005】公知例2(D. V. Averin and Yu. V. Nazarov, "Single Charge Tunneling -Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures," ed. Hermann Grabert and Michel H. Devoret, Plenum Press, New York, 1992, Chap. 6, pp.217-247.)にも示されているように、トンネル磁気抵抗効果素子の微小二重接合系の電気伝導特性を測定すると、バイアス電圧Vがゼロの付近の電圧領域において、クーロンブロッケイド効果により古典的トンネル電流Iは見られない。この古典的トンネル電流Iが見られない電圧領域をブロッケイド領域と呼ぶことにすると、ブロッケイド領域の外側においては、古典的トンネル電流Iが存在し、トンネル電流Iは電圧Vにほぼ比例する。すなわち、バイアス電圧Vがブロッケイド領域内とブロッケイド領域の外側とを隔てる電圧Vcよりも小さい(V<Vc)場合つまりブロッケイド領域内の場合の微小二重接合のI-V特性は次式で表される。

## 【0006】

【数1】 $I \propto 0$

また、トンネル抵抗をR1、R2をすると、バイアス電圧Vが電圧Vcよりも大きい(V>Vc)場合つまりブロッケイド領域の外側の場合の微小二重接合のI-V特性は次式で表される。

## 【0007】

【数2】 $I \propto V / (R1 + R2)$

一方、ブロッケイド領域内においても、量子力学的には高次の項に由来するトンネル電流が観測され、電子の電荷をe、ボルツマン定数をkとすると、このトンネル電流Iは次式で表される。

## 【0008】

【数3】 $I \propto \{e^2 V^3 + (2\pi k T)^2 V\} / (R1 \times R2)$

このトンネル電流  $I$  はコタンネリング効果による電流とも言われ、数3式から明らかなように、電圧  $V$  が一定であれば、トンネル電流  $I$  はトンネル抵抗  $R_1$ 、 $R_2$  の積に反比例し、さらにトンネル電流  $I$  は電圧  $V$  に比例する項および電圧  $V$  の3乗に比例する項を含んでいる。

【0009】このようなコタンネリング効果によるトンネル電流  $I$  はブロッケイド領域の内外に常に存在する。しかしながら、ブロッケイド領域の外側では、コタンネリング効果による電流は古典的トンネル電流に比べ無視できる程度に小さい。一方、ブロッケイド領域内では、0次項に対応する古典的トンネル電流が0である（抑圧される）から、高次項に由来するコタンネリング効果のトンネル電流が主に観測される。

【0010】ところで、軟磁性体層200、201の磁化に対し強磁性体層100の磁化がどちらを向くかによってトンネル抵抗  $R_1$ 、 $R_2$  は変化する。言い換えれば、Niからなる軟磁性体層200、201内電子の伝導電子スピンは弱い外部磁場にも影響され、そのスピンの配向を容易に変化する。一方、Coからなる強磁性体層100は弱い外部磁場には容易に追従しない。その結果、外部磁場によって軟磁性体層200、201内電子の磁化の向きと強磁性体層100内の磁化の向きとが平行である場合と反平行である場合とに切り替わることになる。その結果、軟磁性体層200、201から強磁性体層100または強磁性体層100から軟磁性体層200、201へのトンネルレートを変化し、トンネル抵抗  $R_1$ 、 $R_2$  が外部磁場の変化によって変化するのである。この外部磁場によってトンネル抵抗  $R_1$ 、 $R_2$  が変化する効果はトンネル磁気抵抗効果と呼ばれている。図12に示したトンネル磁気抵抗効果素子においては、トンネル磁気抵抗効果により外部磁場の変化に対応したトンネル電流  $I$  の変化が観測される。

【0011】ところが、数1～数3式によれば、ブロッケイド領域内で観測されるコタンネリング効果によるトンネル電流  $I$  はトンネル抵抗  $R_1$  とトンネル抵抗  $R_2$  との積に反比例するのに対し、ブロッケイド領域の外側で観測される古典的トンネル電流  $I$  はトンネル抵抗  $R_1$  とトンネル抵抗  $R_2$  との和に反比例するにすぎない。その結果、バイアス電圧  $V$  が一定のときには、ブロッケイド領域の外側の場合よりもブロッケイド領域内の方が磁場の変化に対するトンネル電流  $I$  の変化がより増強される結果となる。この現象を言い換えれば、磁場変化による電圧  $V$  とトンネル電流  $I$  との比で定まる微小二重接合全体の抵抗  $R$  の変化は、ブロッケイド領域内において増強される結果となる。すなわち、個々のトンネル抵抗  $R_1$ 、 $R_2$  の変化はブロッケイド領域内とブロッケイド領域の外側とで同一であるのに、コタンネリング効果による電流を介して微小二重接合全体の抵抗  $R$  の変化を観測すると、より大きい電流変化となるのである。この効果はトンネル現象の高次の項に由来するものであり、

暗に0次項のみを対象としたトンネル磁気抵抗効果とは異なるメカニズムからなっている。しかし、このようなコタンネリング効果による現象もトンネル現象全体の一部の効果によるものであるから、これをコタンネリング効果に基づく磁気抵抗効果の増強と呼ぶことにする。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】図12に示した二重微小接合型のトンネル磁気抵抗効果素子は、磁気抵抗効果の原因がコタンネリング効果に由来することから、単電子素子として有効に動作することが素子動作の前提となる。しかし、公知例1によればトンネル磁気抵抗効果素子は20mK程度の極低温にて動作が確認されたに過ぎない。また、公知例1によれば強磁性体層100のサイズは150nm×2500nmであるが、室温において動作するためには、強磁性体層100のサイズが5×5nm以下でなければならない。このように、従来技術と室温動作可能な素子への要求は大きく隔たっており、従来の微細加工技術では到達不可能な強磁性体層100のサイズを製作することが要求される。

【0013】また、二重微小接合型のトンネル磁気抵抗効果素子は、従来の磁気抵抗(MR)効果素子および巨大磁気抵抗(GMR)効果素子に比較して、高いインピーダンスを持つことになる。なぜなら、トンネル抵抗が量子抵抗  $R_K$  (約25.8Ω) より十分大きいことがクローンブロッケイド効果が発現するための必要条件となっているからである。そのため、トンネル磁気抵抗効果素子の高インピーダンス化を避ける工夫が必要となる。また、トンネル磁気抵抗効果素子の高インピーダンス化が十分に回避できない場合には、S/N比を向上させるために従来とは異なる信号検出方法を用いる必要が生ずる。

【0014】本発明は上述の課題を解決するためになされたもので、室温で動作可能である多重トンネル接合、トンネル磁気抵抗効果素子、磁気センサ、磁気記録センサヘッドを提供することを目的とする。

【0015】また、トンネル電流の変化を高いS/N比で検出することができる磁気センサ、磁気記録センサヘッドを提供することを目的とする。

【0016】

【課題を解決するための手段】この目的を達成するため、本発明においては、平面基板上に軟磁性体材料、強磁性体材料の一方からなる第1の磁性体層を形成し、上記第1の磁性体層上に第1、第2のトンネルバリア層を形成し、上記第1、第2のトンネルバリア層間に軟磁性体材料、強磁性体材料の他方からなる磁性体微粒子を設け、上記第2のトンネルバリア層上に軟磁性体材料、強磁性体材料の一方からなる第2の磁性体層を形成する。

【0017】この場合、上記磁性体微粒子の自己容量を10aF以下とする。

【0018】また、上記磁性体微粒子をコロイド微粒子

とする。

【0019】また、上記第1、第2のトンネルバリア層および上記磁性体微粒子を誘電体材料と強磁性体材料とをターゲットとした同時スパッタリングにより堆積した複合膜を加熱処理することによって形成する。

【0020】また、上記磁性体微粒子を複数設ける。

【0021】また、トンネル磁気抵抗効果素子において、上記の多重トンネル接合を用いる。

【0022】また、上記のトンネル磁気抵抗効果素子を用いた磁気センサにおいて、上記多重トンネル接合のブロッケイド領域内のバイアス電圧を加える。

【0023】また、上記のトンネル磁気抵抗効果素子を用いた磁気センサにおいて、上記第1、第2の磁性体層間に交流電圧を加える交流電圧源を設け、上記交流電圧の電流応答の内の第2高調波以上の周波数を有する高調波信号成分のみを取り出すハイパスフィルタを設ける。

【0024】また、磁気記録センサヘッドにおいて、上記の磁気センサを用いる。

【0025】

【発明の実施の形態】図1は本発明に係る多重トンネル接合を有するトンネル磁気抵抗効果素子を示す断面図である。図に示すように、絶縁体層からなる基板11上に軟磁性体材料からなる第1の軟磁性体層（ベース電極）210が形成され、基板11、軟磁性体層210上に絶縁層350が形成され、軟磁性体層210上の絶縁層350により囲まれた領域に誘電体薄膜からなる第1、第2のトンネルバリア層310、311が形成され、トンネルバリア層310とトンネルバリア層311との間に粒径が10nm以下の強磁性体材料からなる強磁性体微粒子110が設けられ、トンネルバリア層311上に軟磁性体材料からなる第2の軟磁性体層（トップ電極）211が形成され、軟磁性体層210、トンネルバリア層310、強磁性体微粒子110、トンネルバリア層311、軟磁性体層211により多重トンネル接合（微小二重接合）が形成されている。

【0026】つぎに、図2～図6により図1に示した多重トンネル接合、トンネル磁気抵抗効果素子の製造方法を説明する。

【0027】まず、図2((b))は(a)のA-A断面図)に示すように、基板11上に軟磁性体層210をホトリソグラフィと真空蒸着とを用いて形成する。この場合、基板11としてはSi基板上に熱酸化によって形成された400nm以上の膜厚を有するSiO<sub>2</sub>膜を用いることができ、また軟磁性体層210としては10nm程度の膜厚のNiFe膜、パーマロイ膜、センダスト膜などを用いることができる。

【0028】つぎに、図3((b))は(a)のB-B断面図)に示すように、基板11、軟磁性体層210上に絶縁層350を形成する。この場合、絶縁層350には中心部のデバイス形成部354と左右部のボンダッド形

成部352とに対応する窓部を開ける。

【0029】つぎに、図4((b))は(a)のC-C断面図)に示すように、デバイス形成部354の窓のみにトンネルバリア層310を形成する。この場合、トンネルバリア層310としてはたとえば酸化アルミターゲットをスパッタリングして形成した1nm厚程度の酸化アルミ層等の各種誘電体薄膜を用いることができる。つぎに、トンネルバリア層310の表面に粒径が10nm以下の強磁性体微粒子110を単層となるように付着させる。この場合、公知例3(J. R. Thomas, "Preparation and Magnetic Properties of Colloidal Cobalt Particles," Journal of Applied Physics vol. 37, 2914 (1966))に示された方法によって作製されたコロイド溶液に含まれるコバルト微粒子を強磁性体微粒子110として用いる。すなわち、ポリマー分子のサーファクタントに被覆されかつ直径8nm程度のコバルト微粒子からなるコロイド溶液中にトンネルバリア層310を形成した直後の基板を浸し、強磁性体微粒子110(コバルト微粒子)をトンネルバリア層310上に一層だけ付着させる。基板を浸す時間は24時間程度とし、この間基板面に平行な静磁界H<sub>0</sub>をかけ続ける。すると、基板面に平行な静磁界H<sub>0</sub>中では軟磁性体層210はこの静磁界H<sub>0</sub>の方向に磁化される。ところが、スパッタリングによる成膜方法により形成された軟磁性体層210の表面には図5に示すようなナノメータスケールの凹凸が存在する。本来、軟磁性体は透磁率の高い材料であるが、このような凹凸の存在によって磁極312が生じ、軟磁性体層210表面の極く近傍に漏れ磁界が分布し、トンネルバリア層310が十分に薄いことから、漏れ磁界はトンネルバリア層310上にまで沁み出していると考えられる。一方、強磁性体微粒子110は各結晶方位で決まる方向に磁化しているが、強磁性体微粒子110自体は回転ブラウン運動をしながらトンネルバリア層310に到達し、強磁性体微粒子110の磁気モーメントは必ずしも一定の方向を向いていない。しかし、トンネルバリア層310の表面に到達した後、強磁性体微粒子110はトンネルバリア層310からファンデルワールス力による引力を受けるが、同時に強磁性体微粒子110(コバルト微粒子)を被覆するサーファクタント分子の立体障害効果によってトンネルバリア層310から斥力を受ける。このため、強磁性体微粒子110のトンネルバリア層310の表面への束縛は弱く、トンネルバリア層310の表面上を動き回ることができる。そして、強磁性体微粒子110がトンネルバリア層310の表面上を動き回る間に、磁極312の漏れ磁界の存在する箇所に到達すると、強磁性体微粒子110の磁化の向きが漏れ磁界の向きに合致するように配向し、強磁性体微粒子110はトンネルバリア層310表面上に固定される。ここで重要なことは、強磁性体微粒子110の磁化がトンネルバリア層310の表面に平行に配向したまま固定され

ることである。このような強磁性体微粒子110の固定方法によれば、軟磁性体層210の表面の凹凸による磁極312の分布によって強磁性体微粒子110の分布や密度が決められることになる。その結果、各強磁性体微粒子110は平均20nm程度の間隔をおいてランダムな配置をとってデバイス形成部354全体に均一に付着する。そして、強磁性体微粒子110を固定した後、コロイド溶液の溶媒を除去する。

【0030】つぎに、図6((b)は(a)のD-D断面図)に示すように、強磁性体微粒子110が付着した基板に酸素プラズマアッシングを施し、強磁性体微粒子110(コバルト微粒子)の表面のサーファクタント分子を除去したのち、トンネルバリア層310の形成と同様な方法により、トンネルバリア層311を形成し、さらに軟磁性体層211を形成する。この場合、軟磁性体層211としては10nm程度の膜厚のNiFe膜、パーマロイ膜、センダスト膜などを用いることができる。つぎに、軟磁性体層210と軟磁性体層211とにリード線(図示せず)をボンディングし、外部回路に接続する。

【0031】ここで、強磁性体微粒子110の大きさは重要なパラメータとなる。すなわち、ほとんどの強磁性体からなる微粒子はその直径が3nm以下となると室温において保磁力を失い、超常磁性を示すようになる。一方、10nm以下の金属微粒子が持つ自己容量は1aF( $10^{-18}$ F)程度となり、この自己容量の値から計算されるチャージングエネルギーは100meV程度となり、室温における熱的励起エネルギー25meVを十分に上回ることができる。したがって、強磁性体微粒子110の直径が10nm以下であることが、室温において顕著なクーロンブロッケイド効果を得るための目安となる。そこで、保持力を保つ目的のために、ある程度以上の大きさを有する強磁性体微粒子110を用いる必要があること、および室温においてクーロンブロッケイド効果を観測するために、十分小さい強磁性体微粒子110を用いることの、双方の条件を満たす強磁性体微粒子110のサイズを選定する必要がある。

【0032】このトンネル磁気抵抗効果素子においては、ある一個の強磁性体微粒子110から見れば、軟磁性体層210と軟磁性体層211と間にはトンネルバリア層310、311が存在しており、上述の如く一個の強磁性体微粒子110を介して多重トンネル接合が形成されている。そして、強磁性体微粒子110が多数存在するので、多数の多重トンネル接合が並列に軟磁性体層210と軟磁性体層211とを接続している。

【0033】また、軟磁性体層210と軟磁性体層211との間に存在する多数の多重トンネル接合のうち、一個の多重トンネル接合にのみに着目し、仮に軟磁性体層210に対して正の電圧Vが軟磁性体層211に加えられたとする。その際、この電圧Vが今着目している多重

トンネル接合が有するブロッケイド領域内の電圧であるかブロッケイド領域の外側の電圧であるかが問題となる。仮に、この電圧Vがブロッケイド領域の外側に属する電圧であったとすると、軟磁性体層210からトンネルバリア層310を介するトンネルによって強磁性体微粒子110に電子が注入され、続いてトンネルバリア層311を介するトンネルによって電子が強磁性体微粒子110から軟磁性体層211へと放出され、主に古典的トンネル電流からなる単電子トンネル電流が流れる。また、電圧Vがブロッケイド領域内の電圧であったとすると、古典的トンネル電流が抑圧され、コタンネリング効果によるトンネル電流が主に観測される。

【0034】また、軟磁性体層210、211はその膜面内に平行な外部磁界によって容易に磁化反転を起こすことができる。一方、強磁性体微粒子110は結晶構造に固定された磁化を持っているので、外部磁界には容易に追従しない。このような、強磁性体微粒子110と軟磁性体層210、211との磁化(各磁性体層の磁化)が外部磁界に対して異なる応答性をもつことによって、トンネル磁気抵抗効果が得られる。すなわち、強磁性体微粒子110と軟磁性体層210、211との磁化の配向の仕方に対応して、トンネルバリア層310、311のトンネル抵抗R1、R2が変化し、多重トンネル接合を通るトンネル電流Iが変化する。このような、多重トンネル接合のトンネル磁気抵抗効果はバイアス電圧Vがブロッケイド領域内であるかブロッケイド領域の外側であるかによっても変化し、ブロッケイド領域内であれば、コタンネリング効果により増強される。そして、図1に示した多重トンネル接合、トンネル磁気抵抗効果素子においては、強磁性体微粒子110の直径を10nm以下としているから、室温において顕著なクーロンブロッケイド効果を得ることができるので、室温においてブロッケイド領域内の電圧を加えれば、コタンネリング効果によるトンネル電流を観測することにより、トンネル抵抗R1、R2を検出することができるため、室温動作が可能である。

【0035】以上は、一個の多重トンネル接合に関する議論であるが、軟磁性体層210と軟磁性体層211との間には多数の強磁性体微粒子110が存在し、多数の多重トンネル接合が形成されている。そして、強磁性体微粒子110はその粒径が均一であり、また両トンネルバリア層310、311の膜厚が均一であれば、多数の多重トンネル接合の特性は均一になり、特性のそろった多数の多重トンネル接合が軟磁性体層210と軟磁性体層211との間を並列接続していることになる。また、強磁性体微粒子110は20nm程度の間隔をおいて配置されているから、多重トンネル接合同士の相互作用は無視でき、個々の多重トンネル接合が独立に動作している。したがって、観測される軟磁性体層210と軟磁性体層211との間の抵抗値はこれらの特性のそろった独

立な多重トンネル接合の並列接続の値となる。そして、デバイス形成部354の窓領域が一辺2 $\mu$ m程度の正方形であるとするれば、多重トンネル接合の数は10000個以上となるから、観測される軟磁性体層210と軟磁性体層211との間の抵抗値は単一の多重トンネル接合の場合の1000分の1程度に下がる。また、各多重トンネル接合の特性が均一であることから、ある一個の多重トンネル接合に対して電圧Vがブロッケイド領域内に設定されていたとすれば、他の全ての多重トンネル接合に対してブロッケイド領域内のバイアス電圧が与えられていることになり、全ての多重トンネル接合でコタンネリング効果によるトンネル磁気抵抗効果の増強が得られる。

【0036】図7は本発明に係る他の多重トンネル接合を有するトンネル磁気抵抗効果素子を示す断面図、図8は図7の一部詳細図である。図に示すように、絶縁体層からなる基板11上に軟磁性体層210が形成され、軟磁性体層210上に酸化アルミニウムからなりかつ厚さbが約8nmのマトリクス125が形成され、マトリクス125中に直径aが約6nmの磁性体微粒子であるコ

バルト微粒子120が分散して設けられ、マトリクス125上に軟磁性体層211が形成されている。

【0037】つぎに、図9、図10により図7、図8に示したトンネル磁気抵抗効果素子の製造方法を説明する。まず、図9((b)は(a)のE-E断面図)に示すように、基板11上に軟磁性体層210をホトリソグラフィと真空蒸着とを用いて形成したのち、誘電体材料である酸化アルミニウムと強磁性体材料であるコバルトとの双方をターゲットとして同時スパッタリングを行なうことにより、軟磁性体層210上に厚さ約8nmの複合膜を形成し、リソグラフィにより複合膜のパターンを形成したのち、複合膜を加熱処理することにより、コバルト微粒子120が分散したマトリクス125を形成する。つぎに、図10((b)は(a)のF-F断面図)に示すように、スパッタリングとホトリソグラフィとによりパターンを有する軟磁性体層211を形成する。つぎに、軟磁性体層210と軟磁性体層211とにリード線(図示せず)をボンディングし、外部回路に接続する。

【0038】図7に示した多重トンネル接合、トンネル磁気抵抗効果素子においては、コバルト微粒子120の表面と軟磁性体層210または軟磁性体層211との間は1nm程度の距離があることから、コバルト微粒子120と軟磁性体層210または軟磁性体層211との間に存在するマトリクス125が第1、第2のトンネルバリア層となり、軟磁性体層210、211からコバルト微粒子120への電子のトンネルが可能となる。また、マトリクス125の厚さbが約8nmであることから、軟磁性体層211と軟磁性体層210との間にはコバルト微粒子120は一層しか存在しないので、コバルト微粒子120へのトンネル経路は軟磁性体層210、21

1への経路しか存在しないため、多重トンネル接合を形成している。また、コバルト微粒子120は平均20nm程度の距離をおいて析出しており、個々の多重トンネル接合は独立に振る舞うと考えられる。そして、図7に示した多重トンネル接合、トンネル磁気抵抗効果素子においては、マトリクス125からなる第1、第2のトンネルバリア層およびコバルト微粒子120からなる磁性体微粒子を容易に形成することができる。

【0039】なお、誘電体材料としては酸化アルミニウムの他に二酸化珪素等を使用することができ、また強磁性体材料としてコバルトの他に鉄またはその他の合金等を使用することができ。

【0040】また、図1、図7に示したトンネル磁気抵抗効果素子においては、多重トンネル接合のブロッケイド領域内に対応する電圧Vを軟磁性体層210と軟磁性体層211とに加え、トンネル電流Iの磁場に対する変化をモニターすることによって、磁気センサとして動作させることができる。また、トンネル電流Iを固定しておき、軟磁性体層210と軟磁性体層211との間に発生する電圧Vをモニターすることによっても、磁気センサとして動作させることができる。ただし、発生する電圧Vがブロッケイド領域内にあるように、電流バイアスIを設定する必要がある。また、このような磁気センサを磁気記録センサヘッドに用いることもできる。いずれにしても、磁場の変化は軟磁性体層210と軟磁性体層211との間の端子間抵抗Rの変化として検出される。発明者等の実験によれば、図1に示したトンネル磁気抵抗効果素子において、観測される端子間抵抗値Rは数百k $\Omega$ 程度であった。また、端子間抵抗Rは1000e程度の外部磁場において最大となり、端子間抵抗値Rと1kOe以上の外部磁場で得られる最小端子間抵抗R<sub>m</sub>との差 $\Delta R (=R-R_m)$ は100k $\Omega$ 程度となり、差 $\Delta R$ の最小端子間抵抗R<sub>m</sub>に対する比( $\Delta R/R_m$ )は40%に達した。これを端子間電圧Vの変化として観測すると、20 $\mu$ V程度であった。

【0041】つぎに、図1、図7に示したトンネル磁気抵抗効果素子を有する磁気センサにブロッケイド領域の外側のより大きな電圧Vを加えて、外部磁場の変化をトンネル電流Iの変化として観測することを考える。上記の数3式から明らかなように、このトンネル電流Iは電圧Vに比例する成分と、電圧Vの3乗に比例する成分との2種類を含んでいる。そして、古典的トンネル電流および熱的励起によりトンネルバリア層を越えて素子を通ってきた電子による電流などはすべて電圧Vに比例する成分のみからなっている。このため、ブロッケイド領域の外側のより大きな電圧Vを加えても、電圧Vの3乗に比例する成分のみを検出できれば、トンネル磁気抵抗効果が増強されているコタンネリング効果による成分のみを検出でき、その他の増強の無い電流成分を除去できる。

【0042】図11は本発明に係る磁気センサの検出回路系を示す図である。図に示すように、軟磁性体層211に周波数 $f$ 、電圧 $V(f)$ の交流電圧源500が接続され、軟磁性体層210に電流検出アンプ510が接続され、電流検出アンプ510にハイパスフィルタ520が接続されている。

【0043】この磁気センサの検出回路系においては、外部磁界 $H$ が変化すると、トンネル電流 $I(f, 3f)$ （素子電流）が変化する。そして、トンネル電流 $I(f, 3f)$ は、電圧 $V$ の3乗に比例する項から生ずる周波数 $3f$ の成分と、周波数 $f$ の成分とを含んでいる。しかし、電流検出アンプ510の出力はハイパスフィルタ520に入力され、周波数弁別により周波数 $3f$ の成分のみを有する信号 $V_0(3f)$ を取り出すから、トンネル磁気抵抗効果が増強されていない信号成分を含む周波数 $f$ の成分が除去される。そして、周波数 $3f$ の成分の外部磁界 $H$ の変化に対する応答をセンサ信号として扱えば、電圧 $V$ の3乗に比例する成分は電圧 $V$ の上昇に伴い急激に増加するから、ブロッケイド領域の外側のより大きな電圧 $V$ においてより大きい信号成分を発生する。したがって、軟磁性体層210と軟磁性体層211とに加える電圧 $V$ をブロッケイド領域内に限定することなく、3桁程度高い $S/N$ 比によって外部磁界 $H$ の変化が観測できる。なお、このような磁気センサを磁気記録センサヘッドに用いることもできる。

【0044】なお、上述実施の形態においては、第1、第2の磁性体層として軟磁性体材料からなる軟磁性体層210、211を用い、磁性体微粒子として強磁性体材料からなる強磁性体微粒子110を用いたが、第1、第2の磁性体層として強磁性体材料からなる第1、第2の強磁性体層を用い、磁性体微粒子として軟磁性体材料からなる軟磁性体微粒子を用いてもよい。この場合、軟磁性体微粒子が外部磁界に追従し、第1、第2の強磁性体層が結晶構造に対して固定された磁化を有する。また、上述実施の形態においては、強磁性体微粒子110の自己容量を1aF程度としたが、磁性体微粒子の自己容量を10aF以下とすればよい。

【0045】

【発明の効果】この発明に係る多重トンネル接合、トンネル磁気抵抗効果素子においては、室温においてクーロンプロッケイド効果を得ることができるから、室温においてブロッケイド領域内の電圧を加えれば、コタンネリング効果によるトンネル電流を観測することにより、トンネル抵抗を検出することができるので、室温動作が可能である。

【0046】また、第1、第2のトンネルバリア層および磁性体微粒子を誘電体材料と磁性体材料とをターゲットとした同時スパッタリングにより堆積した複合膜を加熱処理することによって形成したときには、第1、第2のトンネルバリア層および磁性体微粒子を容易に形成す

ることができる。

【0047】また、磁性体微粒子を複数設けたときには、第1、第2の磁性体層間の抵抗値を下げるができる。

【0048】また、磁気センサ、磁気記録センサヘッドにおいて、多重トンネル接合のブロッケイド領域内のバイアス電圧を加えたときには、室温動作が可能である。

【0049】また、磁気センサ、磁気記録センサヘッドにおいて、第1、第2の磁性体層間に交流電圧を加える交流電圧源を設け、交流電圧の電流応答の内の第2高調波以上の周波数を有する高調波信号成分のみを取り出すハイパスフィルタを設けたときには、磁場によるトンネル電流の変化を高い $S/N$ 比で検出することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る多重トンネル接合を有するトンネル磁気抵抗効果素子を示す断面図である。

【図2】図1に示したトンネル磁気抵抗効果素子の製造方法の説明図である。

【図3】図1に示したトンネル磁気抵抗効果素子の製造方法の説明図である。

【図4】図1に示したトンネル磁気抵抗効果素子の製造方法の説明図である。

【図5】図1に示したトンネル磁気抵抗効果素子の製造方法の説明図である。

【図6】図1に示したトンネル磁気抵抗効果素子の製造方法の説明図である。

【図7】本発明に係る他の多重トンネル接合を有するトンネル磁気抵抗効果素子を示す断面図である。

【図8】図7に示したトンネル磁気抵抗効果素子の一部を示す断面図である。

【図9】図7に示したトンネル磁気抵抗効果素子の製造方法の説明図である。

【図10】図7に示したトンネル磁気抵抗効果素子の製造方法の説明図である。

【図11】本発明に係る磁気センサの検出回路系を示す図である。

【図12】従来のトンネル磁気抵抗効果素子を示す図である。

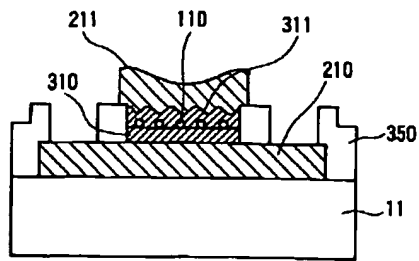
【符号の説明】

- 11…基板
- 110…強磁性体微粒子
- 120…コバルト微粒子
- 125…マトリクス
- 210…第1の軟磁性体層（ベース電極）
- 211…第2の軟磁性体層（トップ電極）
- 310…第1のトンネルバリア層
- 311…第2のトンネルバリア層
- 500…交流電圧源
- 520…ハイパスフィルタ



【図1】

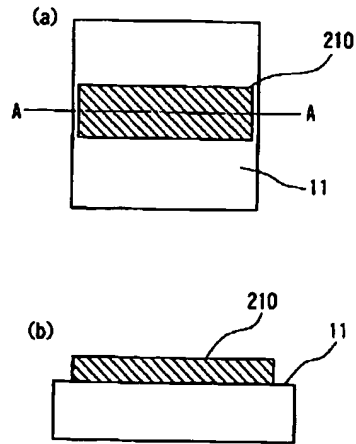
図1



- 11…基板  
 110…強磁性体微粒子  
 210…第1の軟磁性体層(ベース電極)  
 211…第2の軟磁性体層(トップ電極)  
 310…第1のトンネルバリア層  
 311…第2のトンネルバリア層

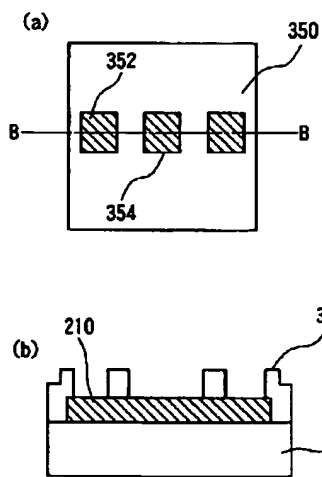
【図2】

図2



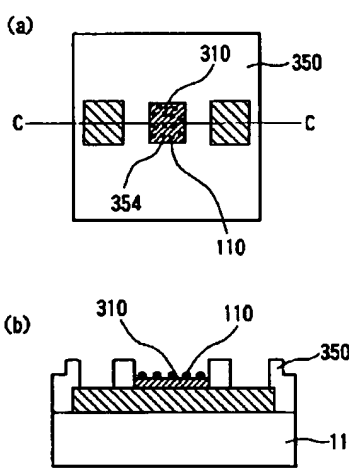
【図3】

図3



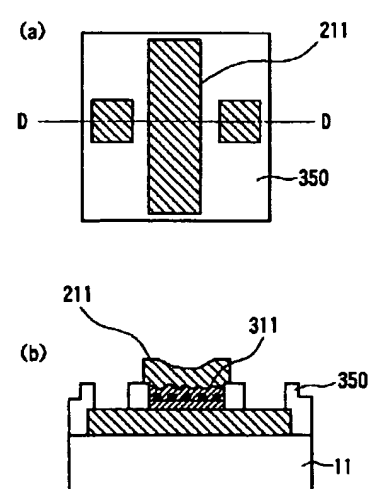
【図4】

図4



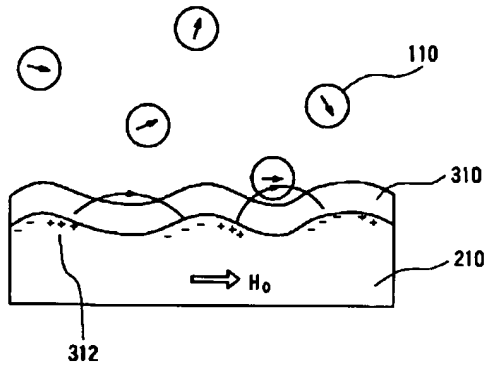
【図6】

図6



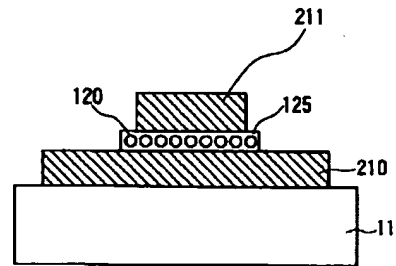
【図5】

図5



【図7】

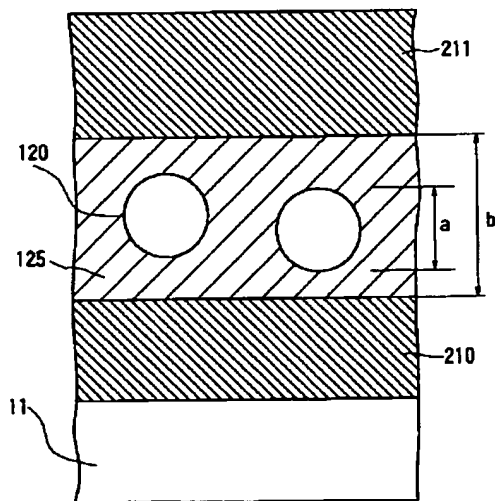
図7



11…基板  
120…コバルト微粒子  
125…マトリクス  
210…第1の軟磁性体層(ベース電極)  
211…第2の軟磁性体層(トップ電極)

【図8】

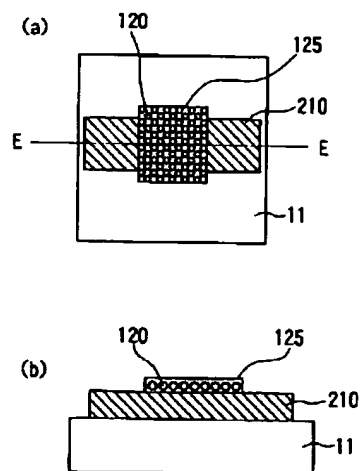
図8



11…基板  
120…コバルト微粒子  
125…マトリクス  
210…第1の軟磁性体層(ベース電極)  
211…第2の軟磁性体層(トップ電極)

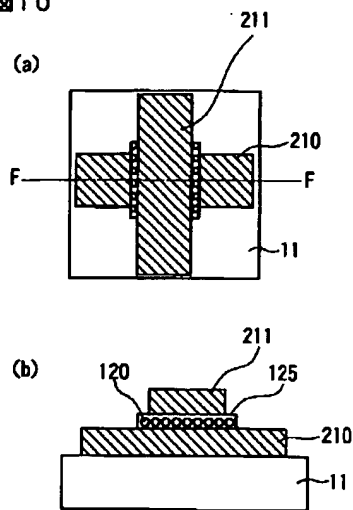
【図9】

図9



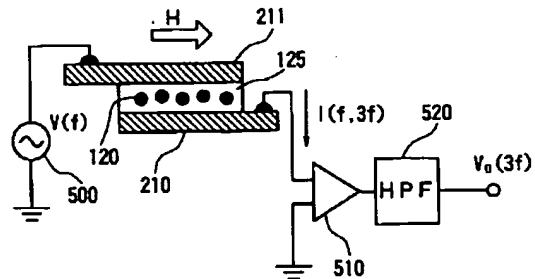
【図10】

図10



【図11】

図11



120…コバルト微粒子  
 125…マトリクス  
 210…第1の軟磁性体層(ベース電極)  
 211…第2の軟磁性体層(トップ電極)  
 500…交流電圧源  
 520…ハイパスフィルタ

【図12】

図12

